



# Магнитное поле в вакууме

## Лекция 3

# План лекции

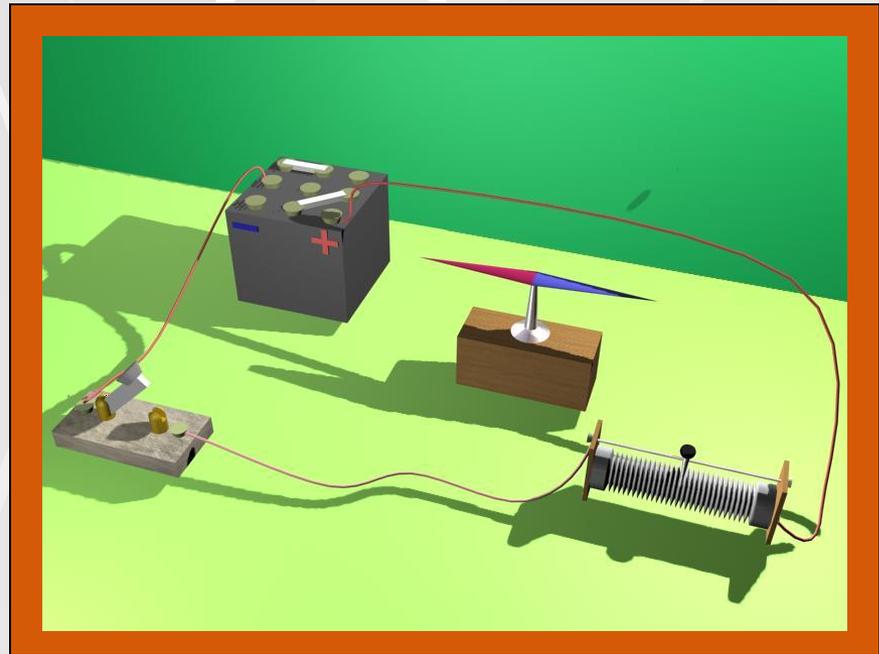
- **Магнитное поле.**
- **Магнитный момент контура с током.**
- **Вектор магнитной индукции. Линии магнитной индукции.**
- **Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Закон Ампера.**
- **Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца.**

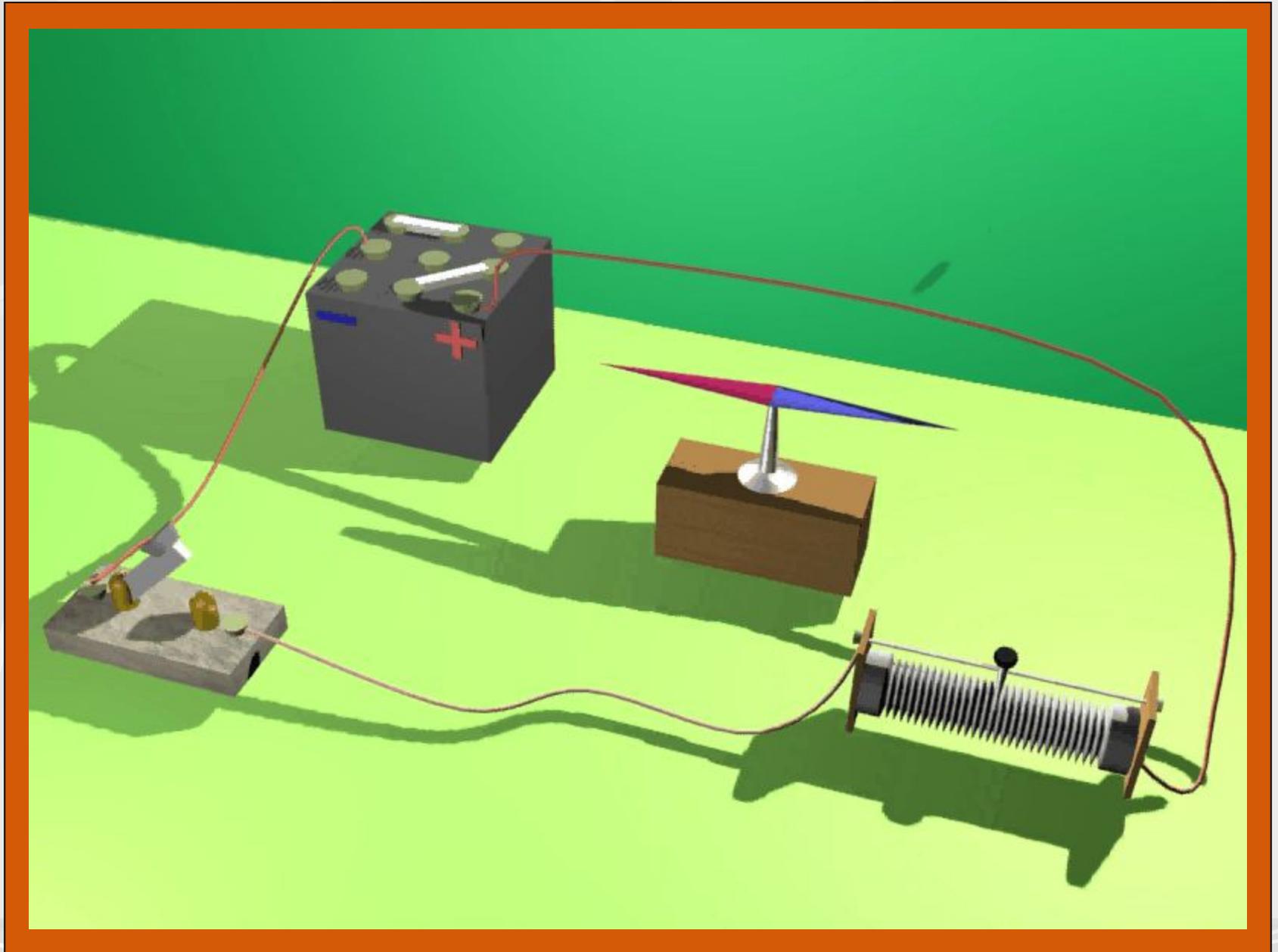
**В 1820 г. датский физик Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка поворачивается при пропускании электрического тока через проводник, находящийся около нее.**



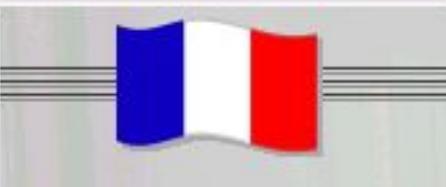
**Эрстед Ганс Христиан**

14.08.1777 – 09.03.1851

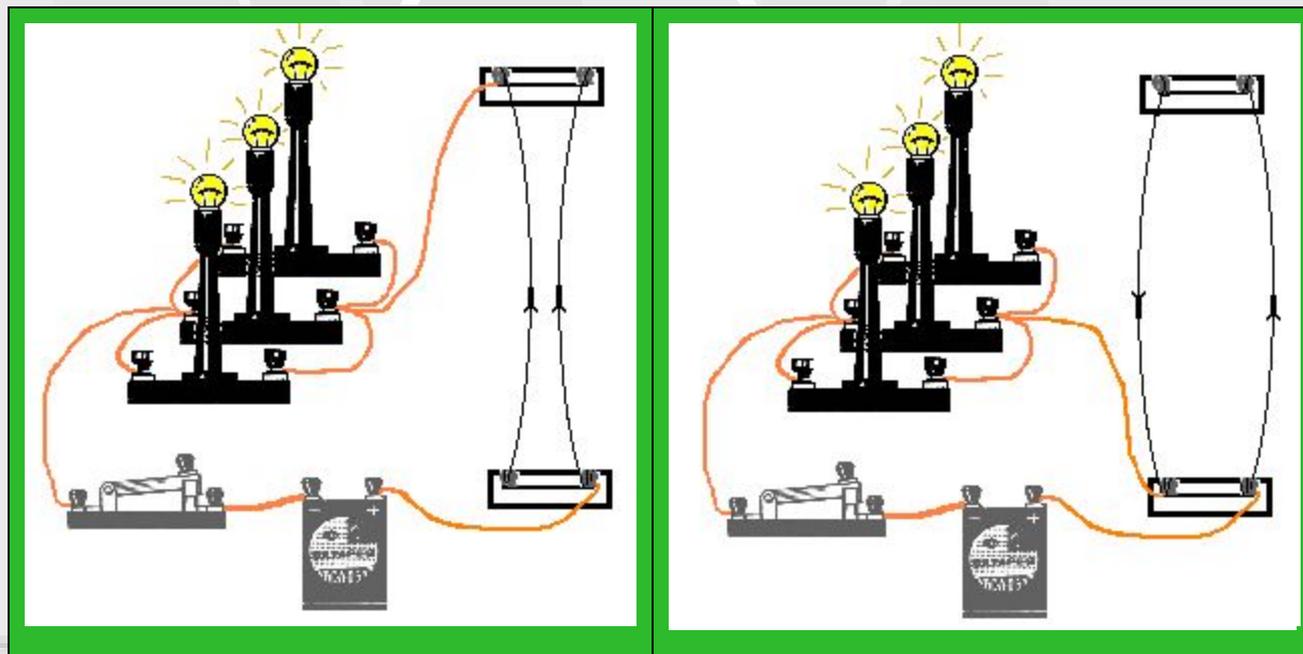




Французский физик **Ампер** установил, что два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение, если ток течет по ним в одну сторону, и отталкивание, если токи текут в разные стороны.



Ампер Андре-Мари  
10.01.1775 – 10.06.1836



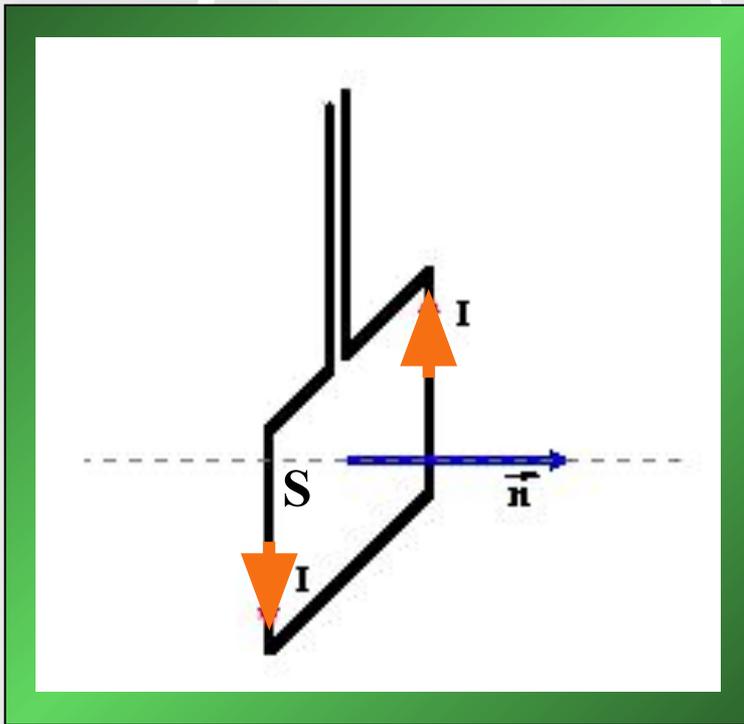
**Магнитное поле** — особый вид материи, посредством которого осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами.

# Основные свойства МАГНИТНОГО ПОЛЯ

- Магнитное поле порождается электрическим током (**движущимися зарядами**).
- Магнитное поле обнаруживается по действию на электрический ток (**движущиеся заряды**).

Для исследования магнитного поля применим пробный ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре очень малых размеров.

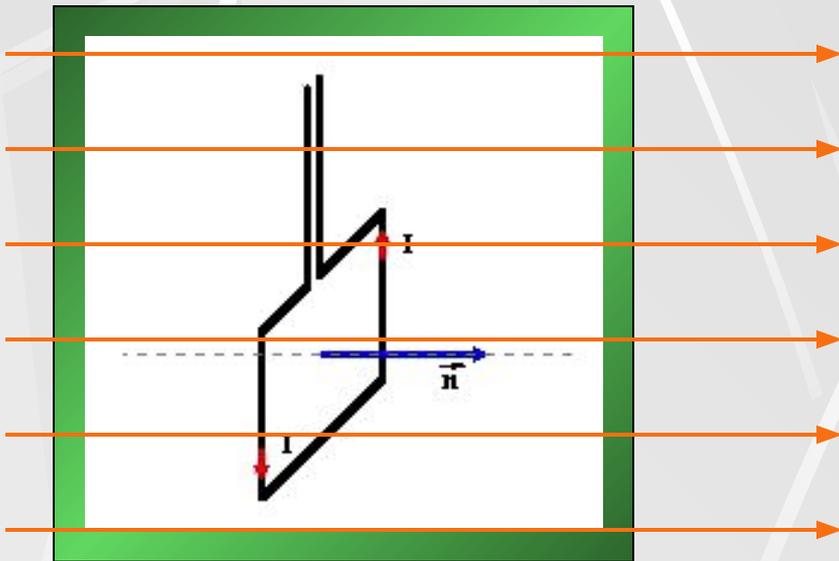
Будем называть такой контур **пробным контуром**.



Ориентацию его в пространстве характеризует направление **нормали** к контуру, восстанавливаемой по правилу **правого винта** (буравчика):

*Если вращать рукоятку правого буравчика по направлению тока в контуре, тогда направление его поступательного движения даст направление нормали.*

Помещая пробный контур в магнитное поле, обнаружим, что поле стремится повернуть контур (нормаль) в определенном направлении.



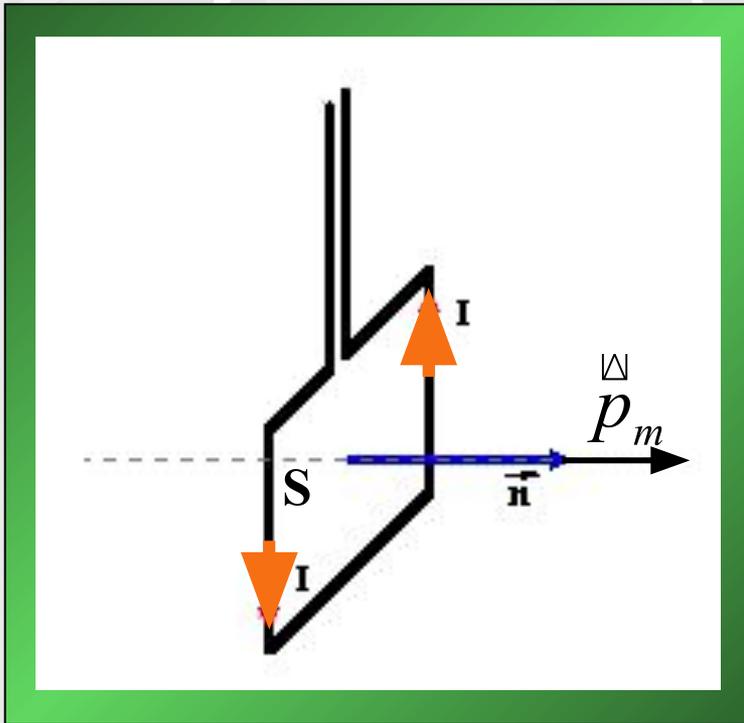
Вращающий момент, действующий на контур, зависит как от свойств магнитного поля в данной точке, так и от свойств контура.

Оказывается, что максимальная величина вращающего момента пропорциональна  $IS$ , т.е.:  $M_{\text{ма}} \sim IS$

$S$  – площадь контура с током;  
 $I$  – сила тока.

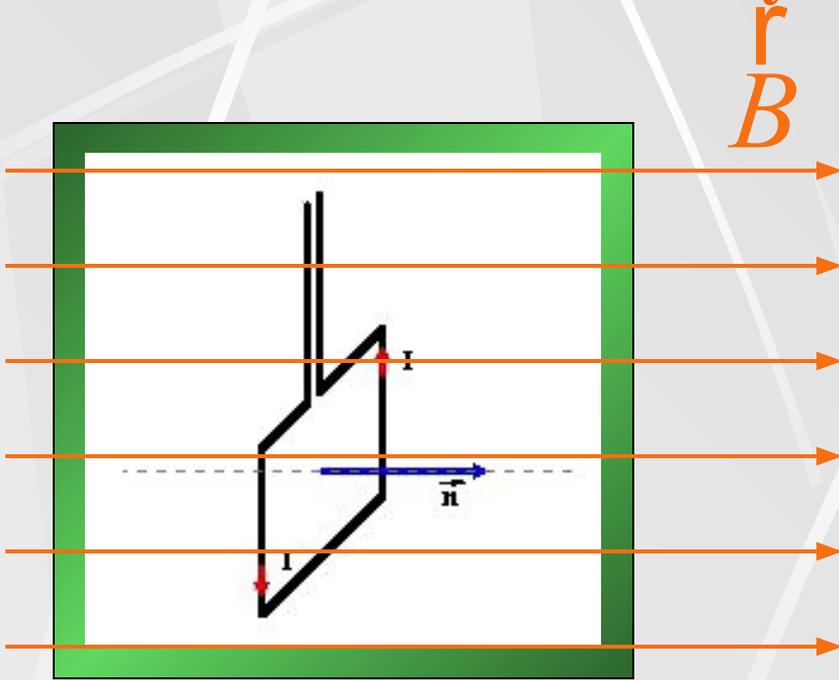
Векторную величину  $\vec{p}_m = IS\vec{n}$  называют магнитным моментом контура.

В СИ измеряется в  $A \cdot m^2$ .



На пробные контуры с разными  $p_m$ , помещаемыми в данную точку магнитного поля, будут действовать разные по величине максимальные вращающие моменты  $M_{max}$ .

Но отношение  $M_{\max} / P_m$  будет для всех контуров одинаково, оно будет являться силовой характеристикой магнитного поля — **магнитной индукцией**.



$$B = \frac{M_{\max}}{P_m}$$

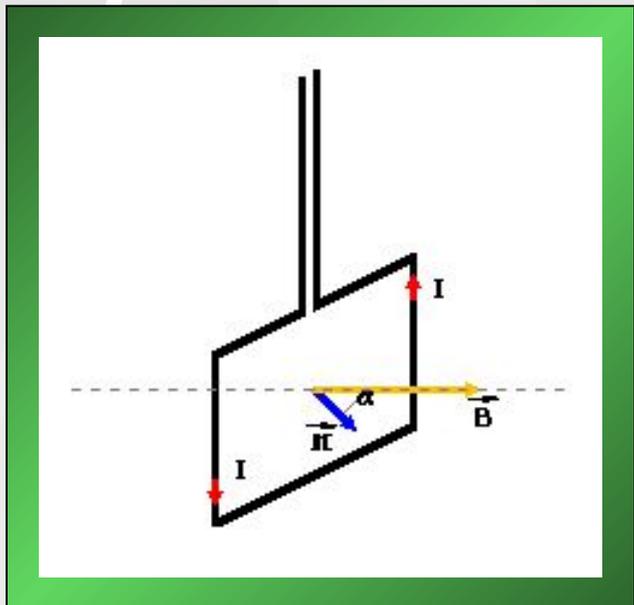
Магнитная индукция есть вектор, направление которого совпадает с направлением нормали контура с током, свободно установившегося во внешнем магнитном поле.

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н} \cdot \text{м}}{1 \text{ А} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$$

На контур с током, помещенный в магнитное поле с индукцией  $B$ , действует **вращающий момент**

$$\vec{M} = \left[ \vec{p}_m \vec{B} \right]$$

Величина его  $M = p_m B \sin \alpha$

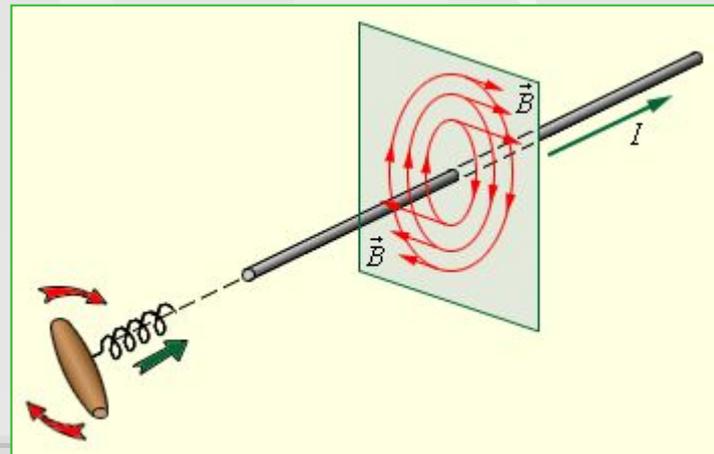
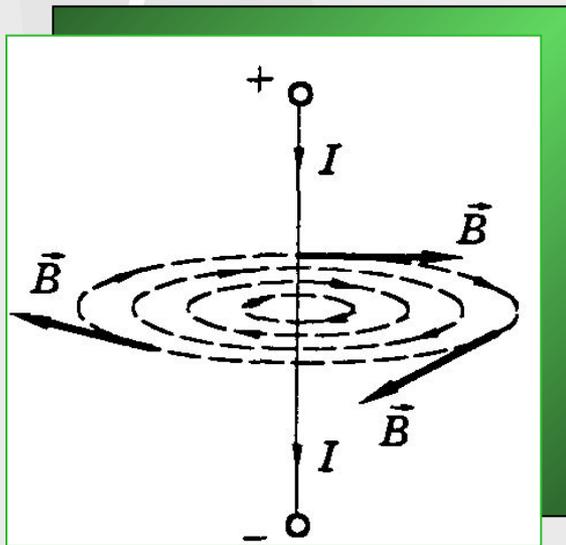


При  $\alpha = 90^\circ$  момент  $M = M_{\max}$  максимален.

При  $\alpha = 0^\circ$  или  $\alpha = 180^\circ$  момент  $M = 0$ .

**Силловые линии, или линии магнитной индукции,** — это такие линии, касательные к которым направлены так же, как и вектор  $\vec{B}$  в данной точке поля.

*Их направление определяют по правилу буравчика.*



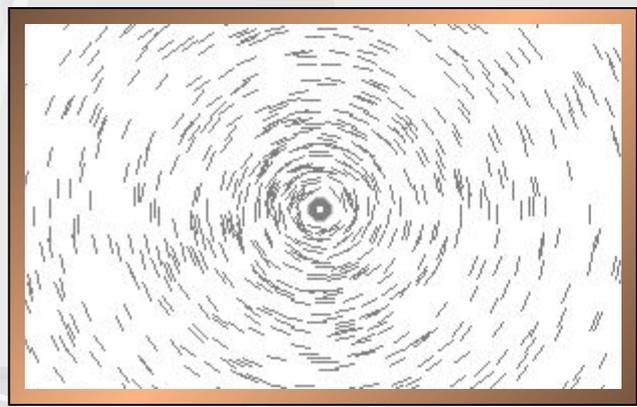
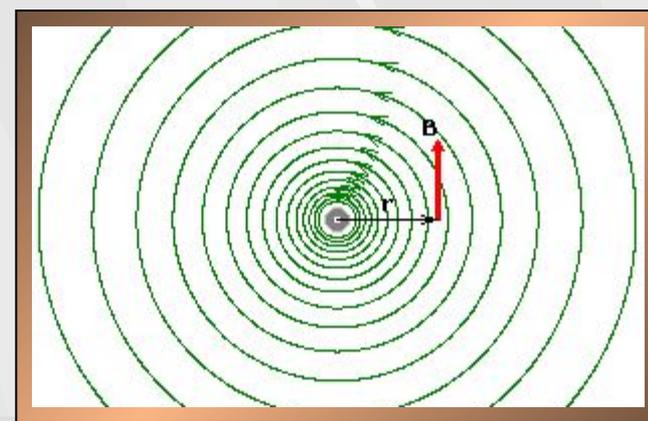
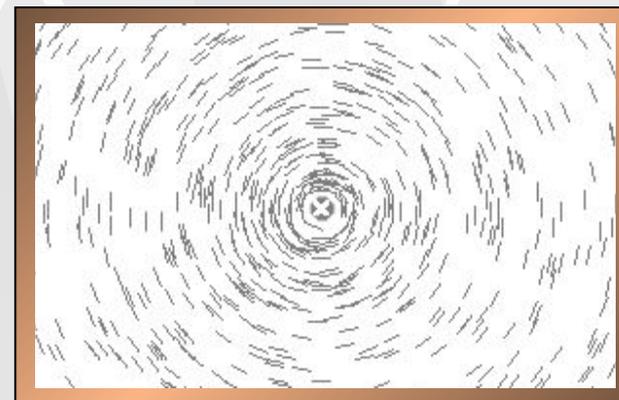
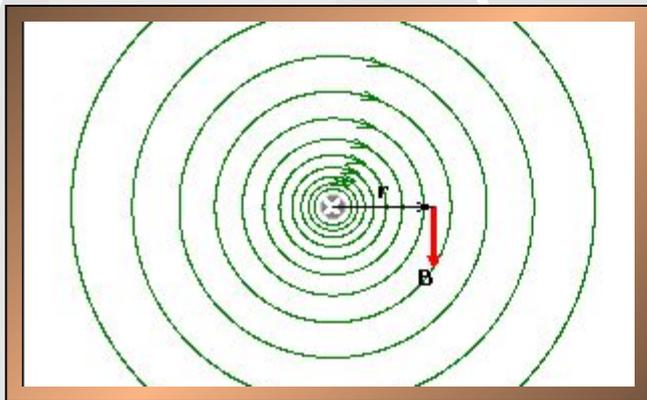
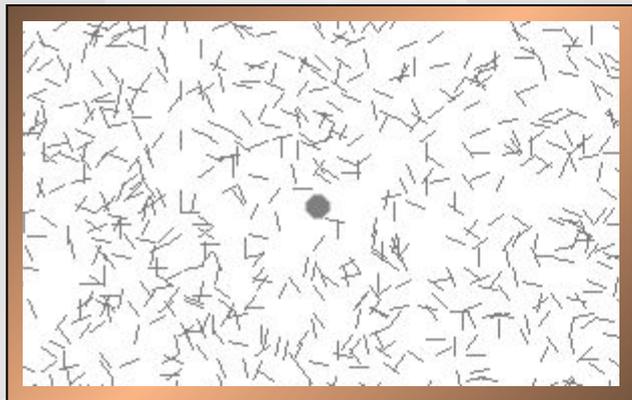


# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО ТОКА

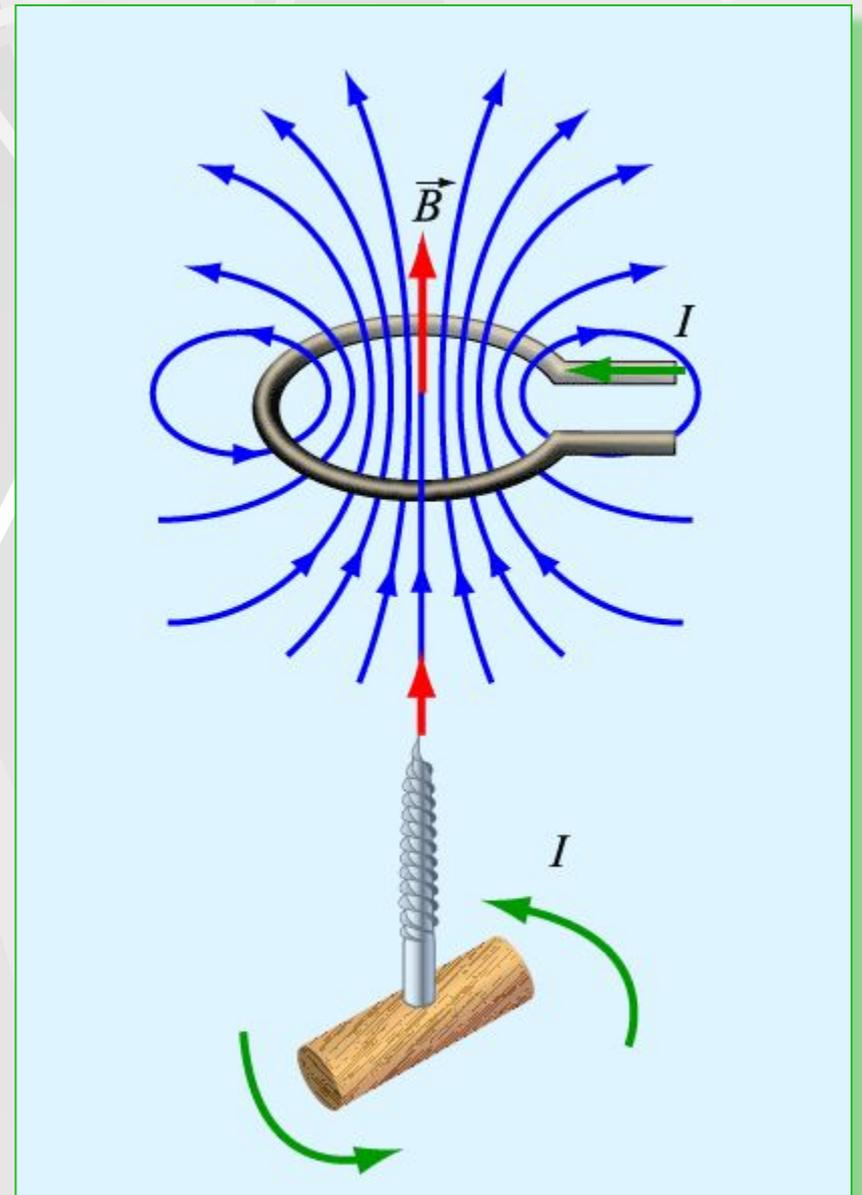
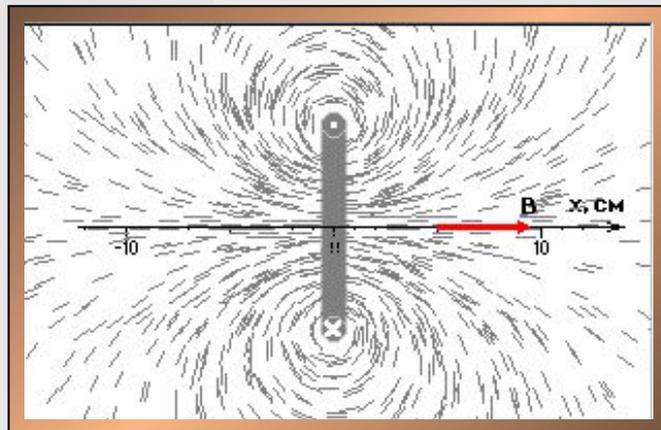
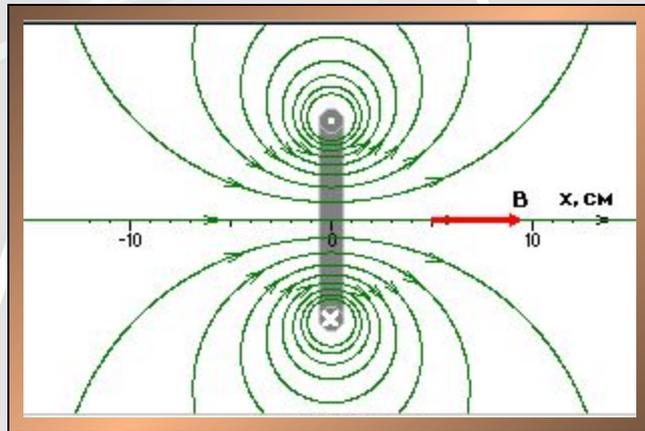
3



# Магнитное поле прямолинейного проводника с током



# Магнитное поле кругового витка с током



*Поле кругового тока неоднородно.*



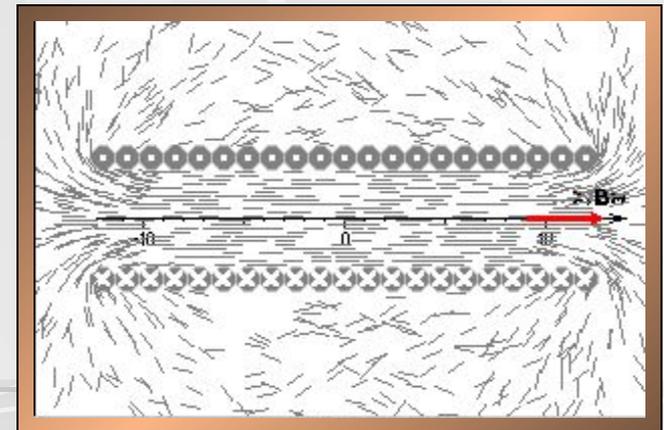
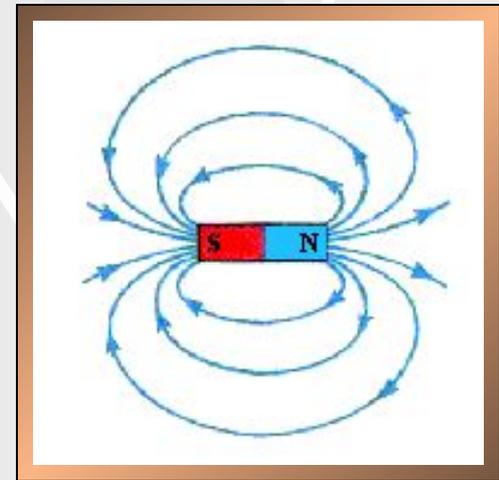
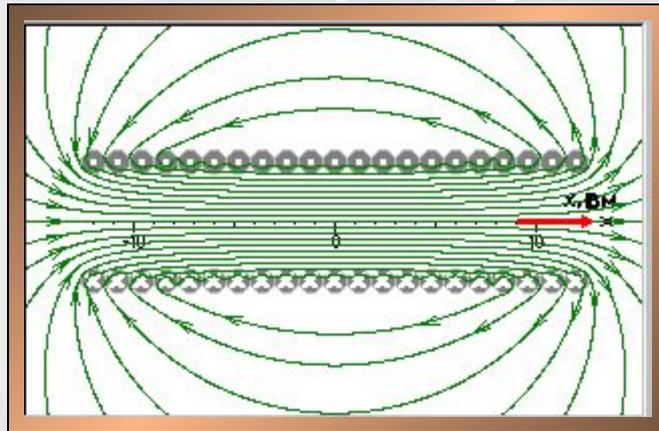
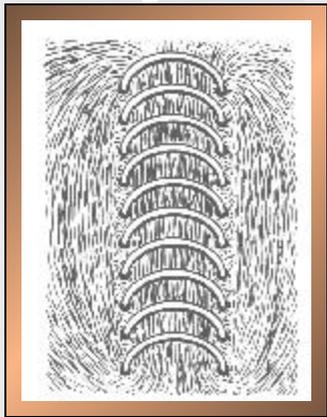
# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КРУГОВОГО ТОКА

4



# Картина магнитного поля катушки с током (соленоида).

Поле, магнитная индукция которого одинакова во всех точках, называется *однородным*.



Магнитное поле внутри соленоида является *однородным*.



# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛЕНОИДА

5



**Линии магнитной индукции всегда замкнуты.**

**Поля с замкнутыми силовыми линиями называют *вихревыми*.**

**Магнитное поле – *вихревое* поле.**

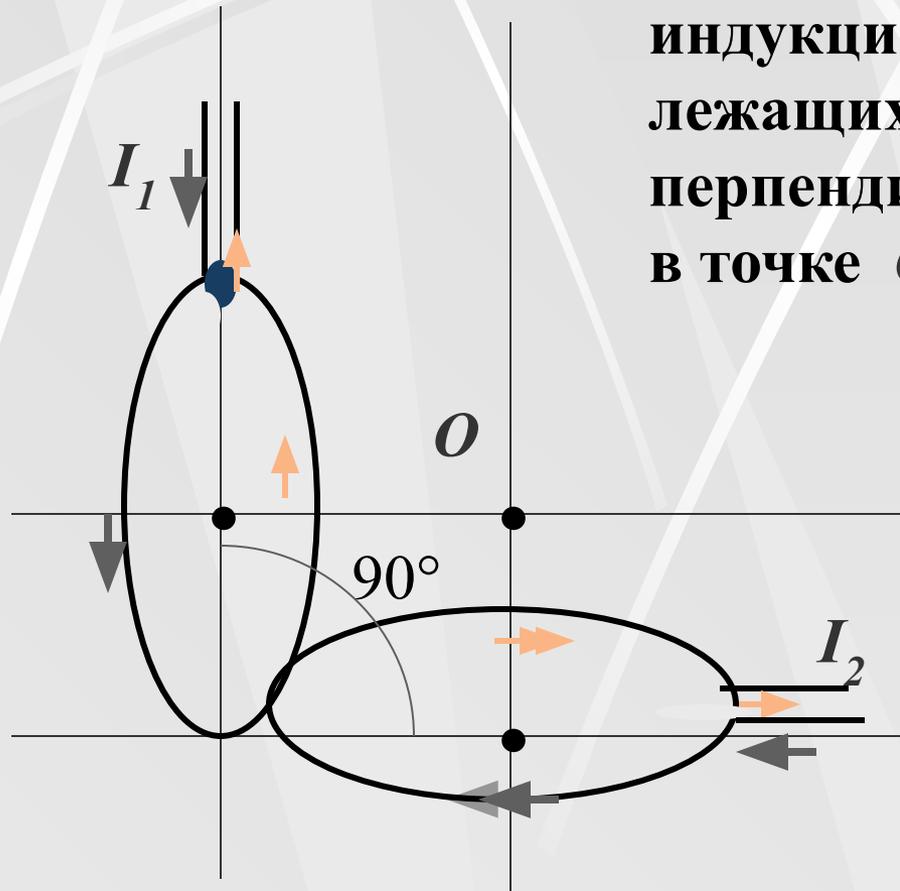
# Принцип суперпозиции

Вектор магнитной индукции поля системы токов в некоторой точке равен геометрической сумме векторов индукции полей каждого из токов в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$

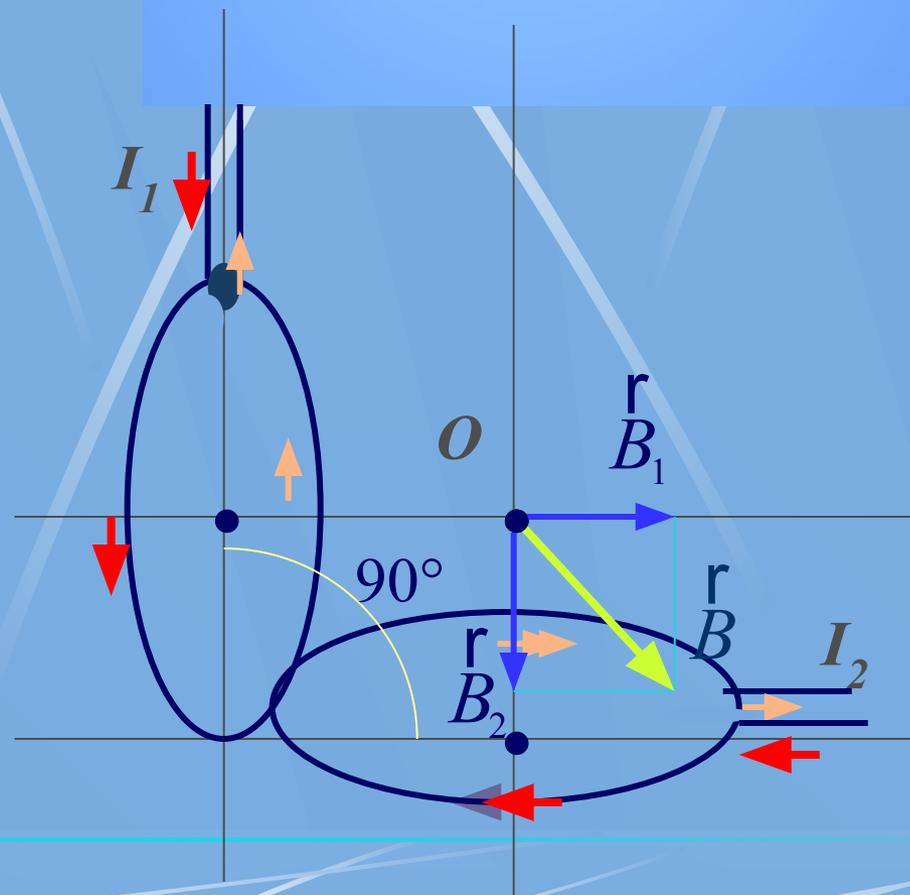
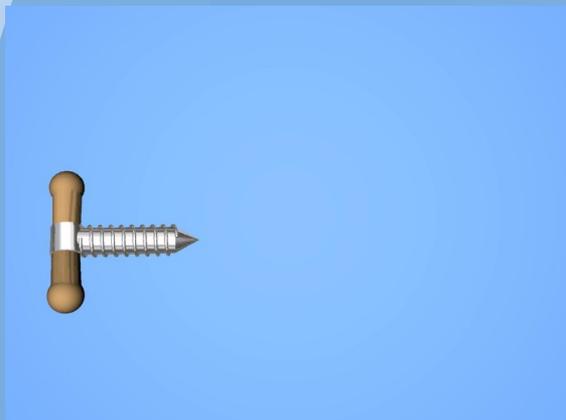
## Задание

Изобразите графически направление вектора магнитной индукции двух круговых токов, лежащих во взаимно перпендикулярных плоскостях, в точке  $O$  пересечения их осей.



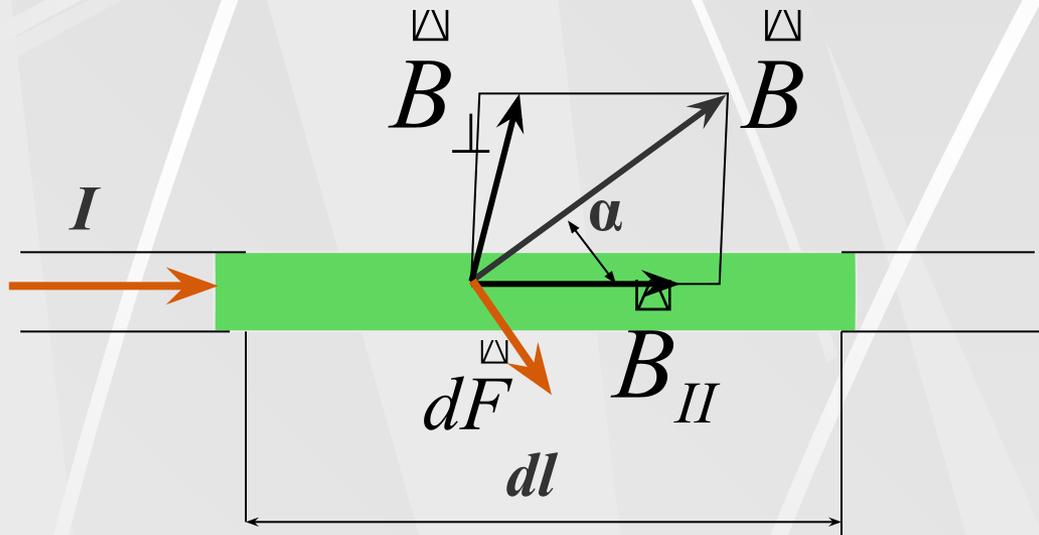
# Решение

Определим по правилу буравчика направление векторов магнитной индукции полей, созданных токами.



Как установил Ампер, на элемент тока  $I dl$ , помещенный в магнитное поле, действует сила.

$$d\vec{F} = I [dl \vec{B}]$$



Ее модуль

$$dF = I B dl \sin \alpha$$

или  $dF = I B_{\perp} dl.$

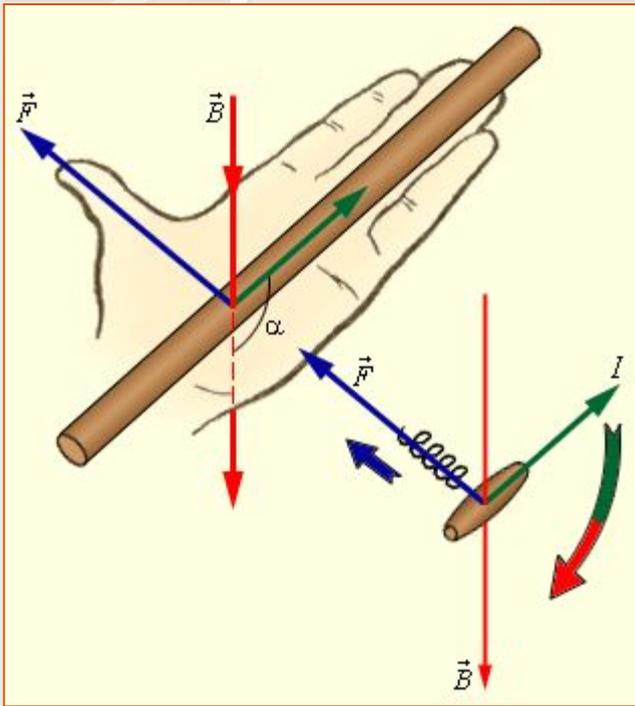
Сила Ампера максимальна при  $\sin \alpha = 1$ , т.е.  $dF_{max} = I B dl$

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \vec{B}]$$

$$dF = B I dl \sin \alpha$$

— закон Ампера

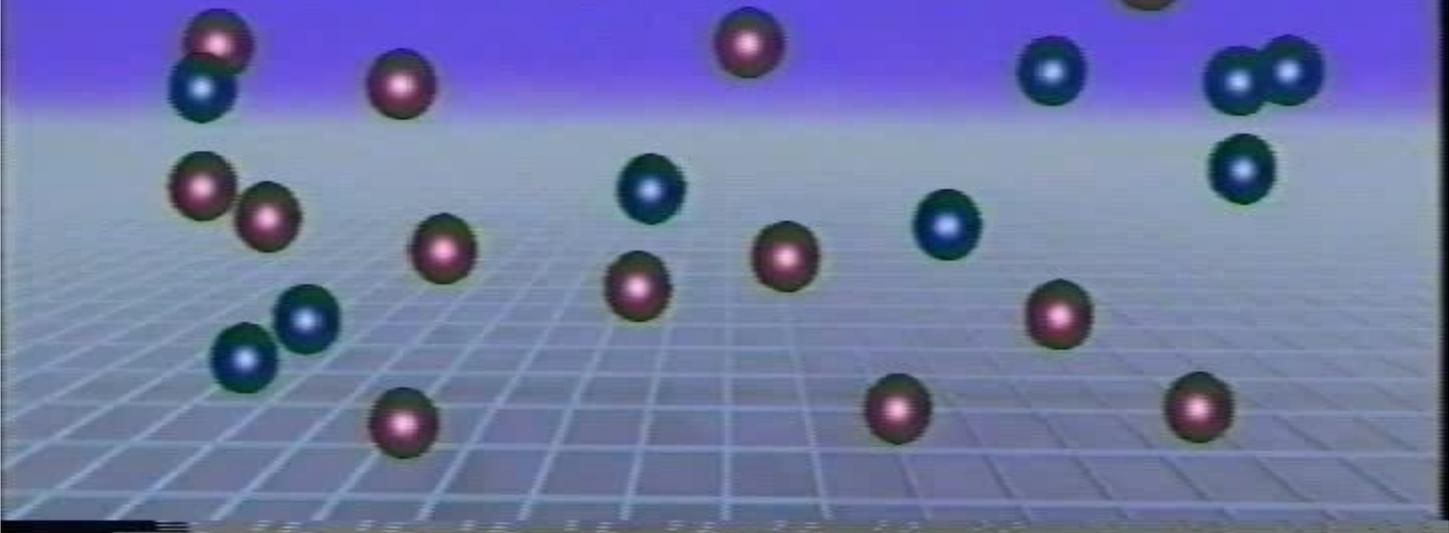
Направление силы Ампера определяют по **правилу левой руки**.



*Если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная составляющая вектора магнитной индукции входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца показывали направление тока, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы Ампера.*

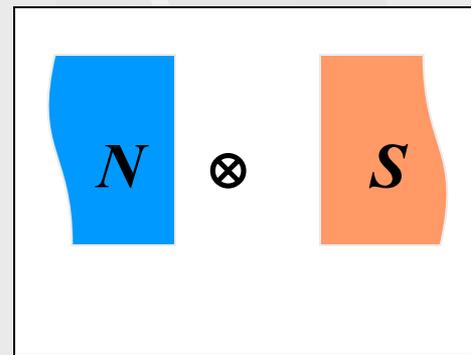
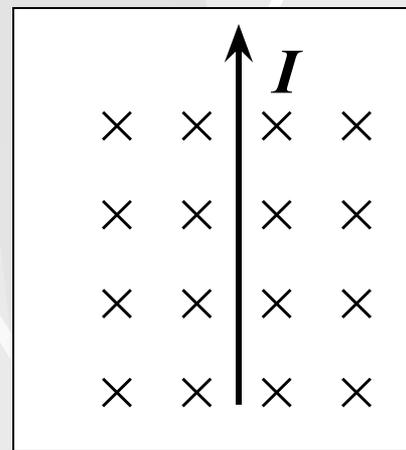
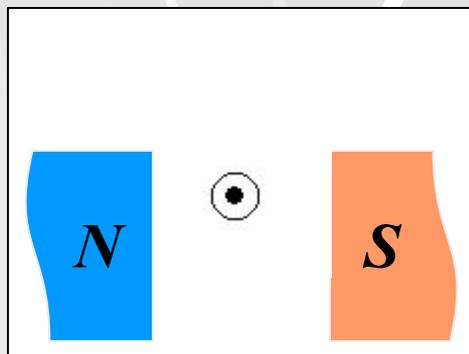
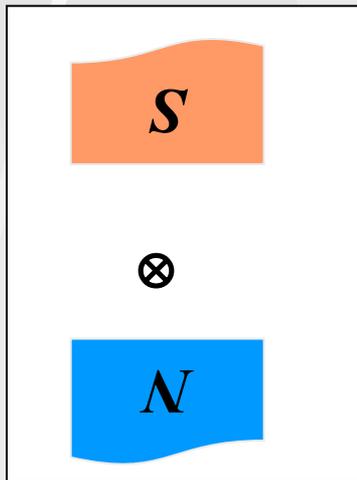
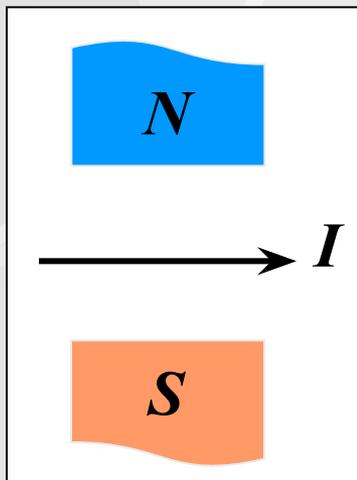


ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО  
ПОЛЯ НА  
ПРОВОДНИК С ТОКОМ  
12

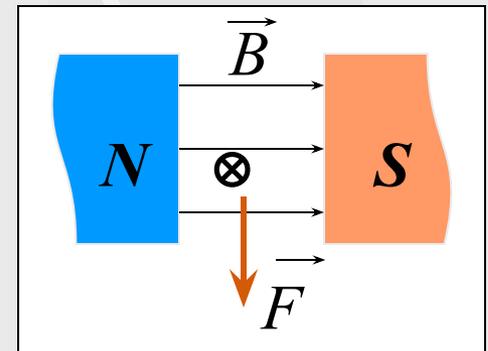
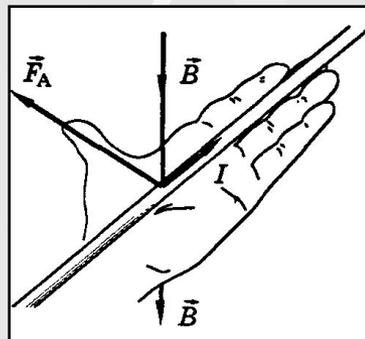
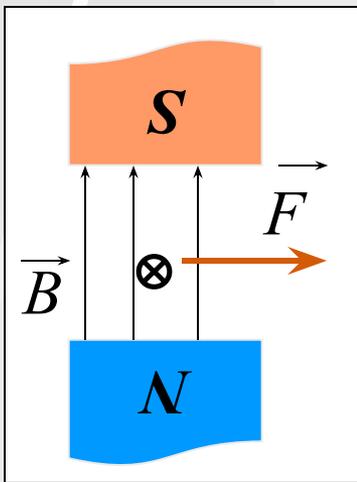
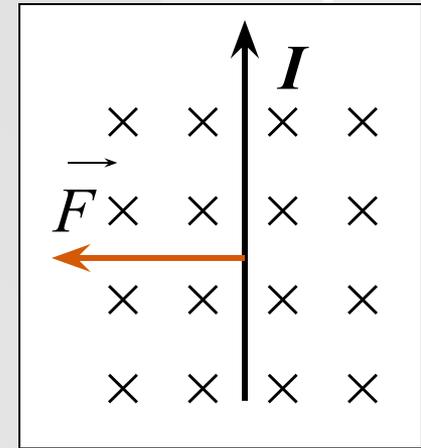
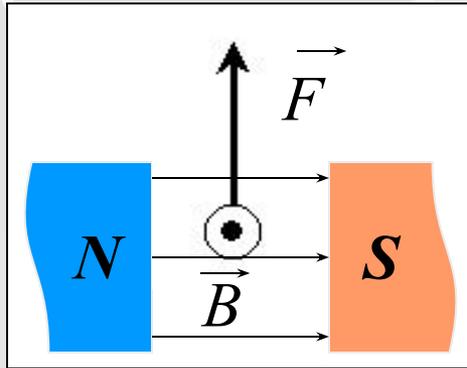
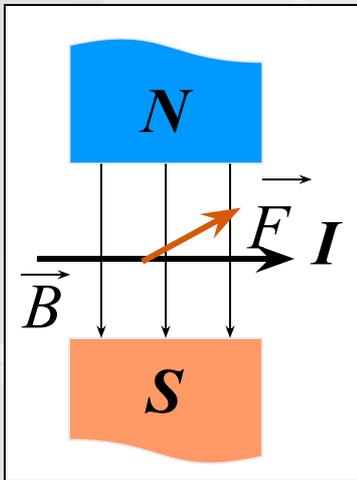


# Задание

Пользуясь правилом левой руки, определите направления силы Ампера в следующих случаях:



# Решение



На элемент тока  $I dl$  в магнитном поле с индукцией  $B$  действует сила Ампера

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \times \vec{B}] \quad [1]$$

Появление этой силы связано с действием силы со стороны магнитного поля на носители тока в проводнике. Покажем это.

Пусть заряд носителя тока  $q$ , скорость его направленного движения  $v$ , концентрация  $n$ , тогда

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{q dN}{dt} = \frac{q n dV}{dt} = q n S \frac{dl}{dt} = q n S v, \quad [2]$$

где  $dQ = q dN$  — заряд в объеме проводника  $dV = S dl$ ;

$n dV = dN$  — число носителей тока в проводнике длиной  $dl$ .

$\vec{dl}$  направлен по току и совпадает со скоростью положительных зарядов.

Сила действующая на один заряд (**сила Лоренца**):

$$\vec{F}_L = \frac{dF}{dN}$$

Учитывая [1] и [2], получим:

$$\vec{F}_L = \frac{dF}{dN} = \frac{qnSv \left[ \vec{dl} B \right]}{ndV} = \frac{qnSv \left[ \vec{dl} B \right]}{nSdl} = q \left[ \vec{v} B \right] \quad [3]$$

Ее модуль равен  $F_L = qvB \sin \alpha$

$\alpha$  — угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Из [3] следует: *Магнитное поле действует только на движущиеся в нем заряженные частицы.*

При наличии электрического поля сила Лоренца равна

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}] \quad \text{— формула Лоренца}$$

# Направление силы Лоренца определяют по правилу левой руки

